

**Microestruturas ósseas e a fossilização
em vertebrados pleistocênicos da Formação
Rio Madeira, Sudoeste Amazônico, Brasil**
*Bone microstructures and fossilization in Pleistocene vertebrates
from Rio Madeira Formation, Southwestern Amazon, Brazil*

Luana Cardoso de Andrade^{1,2}, Vanderlei Maniesi², Amílcar Adamy³

¹Laboratório de Paleontologia, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Avenida Acadêmico Hélio Ramos, s/n - Cidade Universitária, CEP 50740-530, Recife, PE, BR (luanacardosodeandrade@gmail.com)

²Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, Universidade Federal de Rondônia - UNIR, Porto Velho, RO, BR (vanmaniesi@hotmail.com)

³Serviço Geológico do Brasil, CPRM, Porto Velho, RO, BR (amilcar.adamy@cprm.gov.br)

Recebido em 19 de março de 2017; aceito em 07 de dezembro de 2017

Resumo

Microestruturas ósseas e suas relações com a fossilização foram estudadas em elementos esqueléticos de indivíduos de Megatheriidae e Toxodontidae (megafauna pleistocênica de Araras, Rondônia), coletados nas décadas de 1970 a 1990, em depósitos fluviais da Formação Rio Madeira. A utilização de técnicas de microscopia (óptica convencional com luz polarizada e eletrônica de varredura) e determinação química (espectrometria de energia dispersiva) revelou o processo de fossilização com predominância de carbono atuando nos espécimes estudados. O processo foi constatado, pela primeira vez, em fósseis de vertebrados pleistocênicos provenientes de depósitos fluviais da Formação Rio Madeira, caracterizado pela presença da matriz amorfa negra em microestruturas ósseas, com atuação do processo de fossilização associada ao carbono, inicialmente em microestruturas de porções compactas ósseas e, em seguida, degradando porções esponjosas dos ossos. Esse processo gerou diferentes estágios de degradação microestrutural, sendo possível, em alguns casos, identificações histológicas detalhadas; em outros, de total degradação, ocorre somente a matriz amorfa negra disseminada. A matriz amorfa negra possui o carbono como constituinte químico predominante com teores de até 90,19%. Além disso, eventos diagenéticos geraram microfissuras na matriz amorfa negra dos canais de Havers e Volkmann (pós-fossilização), bem como nos osteons (pós-soterramento) e radiais (*post mortem*).

Palavras-chave: Vertebrados pleistocênicos; Fossilização; Microestrutura óssea; Formação Rio Madeira.

Abstract

Bone microstructures and their relationships with the fossilization were studied in skeletal elements of Megatheriidae and Toxodontidae individuals (Pleistocene megafauna of Araras, Rondonia) collected from the 1970s to the 1990s in fluvial deposits from Rio Madeira Formation. The use of microscopy techniques (conventional optics with polarized light and scanning electron) and chemical determination (energy dispersive spectrometry) revealed the fossilization process with predominance of carbon acting in the studied specimens. It is the first record for Pleistocene vertebrates fossils from fluvial deposits of Rio Madeira Formation. This process is characterized by the presence of the black amorphous matrix in bone microstructures. Initially, the process of fossilization associated with carbon acts over microstructures of compact bone portions and, then, degrading the spongy bones. This performance generated different stages of microstructural degradation, being possible in some cases detailed histological identifications and, in others, of total degradation, the dissemination of only the black amorphous matrix. The black amorphous matrix has carbon as the predominant chemical constituent with contents up to 90.19%. In addition, diagenetic events generated microcracks in the black amorphous matrix of the Havers and Volkmann canals (post-fossilization), as well in osteons (post-burial) and radial vascular canals (postmortem).

Keywords: Pleistocene vertebrates; Fossilization; Bone microstructure; Rio Madeira Formation.

INTRODUÇÃO

Estudos envolvendo interações de microestruturas ósseas com fossilização vêm sendo realizados desde décadas em que os instrumentos tecnológicos disponíveis ainda eram escassos (Cook et al., 1962). A complexidade do processo de fossilização em função das variáveis envolvidas em situações distintas (Pfretzschner, 2004) não é diferente na região do Sudoeste Amazônico, que abriga uma variedade de vertebrados pleistocênicos (Costa, 2002), sendo ainda escassos os trabalhos relacionados aos seus aspectos microestruturais e diagenéticos. Localidades com fósseis do Pleistoceno Final são distribuídas na região da Amazônia, com maior concentração nos Estados do Acre e de Rondônia (Mörner et al., 2001).

No Estado de Rondônia ocorre uma significativa diversidade de paleovertebrados pleistocênicos em depósitos fluviais da Formação Rio Madeira, principalmente na localidade de Araras (Cozzuol, 1999; Nascimento et al., 2003, 2005, 2010a, 2010b; Góis et al., 2004, 2012; Porto et al., 2004a, 2004b; Cozzuol et al., 2005, 2006, 2013; Holanda e Cozzuol, 2006; Fortier et al., 2007; Hsiou et al., 2007; Nascimento, 2008; Andrade et al., 2010; Holanda et al., 2011). Eles foram encontrados durante o auge da extração aurífera na região, nas décadas de 1970 a 1990. Esses fósseis, utilizados em análises microestruturais e químicas, podem fornecer dados sobre a paleobiologia do animal, como histologia, ontogenia, diagênese, composição química, paleoambiente ou até associações com outras localidades (Cuezva e Élez, 2000; Ray et al., 2009; Pfretzschner e Tütken, 2011; Rogoz et al., 2012).

Desse modo, para o estudo das condições de fossilização de restos esqueléticos de Megatheriidae e Toxodontidae da localidade de Araras, foram realizadas análises microscópicas e químicas. Buscou-se a compreensão de relações entre as microestruturas ósseas e as condições diagenéticas que atuaram nos sedimentos da Formação Rio Madeira, auxiliando nas interpretações de fatores que possibilitaram a preservação desses restos esqueléticos.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está situada na localidade de Araras, distante 240 km de Porto Velho, e pertence ao município de Nova Mamoré, Rondônia. O acesso é possível por via terrestre, partindo-se da cidade de Porto Velho, percorrendo-se, sentido Acre, 200 km pela BR-364 e, em seguida, mais 40 km pela BR-425 até a área de estudo (Figura 1). Os depósitos fossilíferos da localidade de Araras estão atualmente submersos devido à desativação das atividades de escavação garimpeira (Figura 2). A área de estudo é dividida em dois sítios, situados nas coordenadas geográficas:

1. 10°3'14,4"S e 65°19'25,5" W (Nascimento, 2008);
2. 10°03'01"S e 65°19'31"O (Holanda e Cozzuol, 2006; Góis et al., 2012).

Os depósitos fossilíferos de ambiente fluvial pertencentes à Formação Rio Madeira inicialmente foram atribuídos ao Pleistoceno Final, com base em dados de C^{14} da matéria orgânica com idades entre 27.310 e 46.310 AP (Quadros et al., 2006; Rizzotto et al., 2006). Posteriormente, com a utilização de métodos conjugados de datação, envolvendo termoluminescência (TL) e luminescência opticamente estimulada (LOE), foi ampliado esse espectro para o Pleistoceno Médio, mostrando um intervalo de 9 mil a 130 mil anos AP (Da Rosa et al., 2012) (Figura 3).

A camada em que ocorrem restos de paleovertebrados é caracterizada por um conglomerado de base cascalhífera, conhecido localmente como "mucururu", com camadas métricas de sedimentos conglomeráticos, arenosos, argilosos, siltico-argilosos, inconsolidados a semiconsolidados e ferruginizados, havendo mineralização de ouro aluvionar (Quadros et al., 2006). São descritos processos de ferruginização em sedimentos da Formação Rio Madeira, favorecendo a percolação e precipitação de significativas quantidades de ferro nesses depósitos (Quadros et al., 2006).

A ocorrência dos vertebrados na Formação Rio Madeira pode ter sido resultante da mudança da vegetação, com a substituição da savana pela floresta tropical úmida, com base em dados palinológicos do Sudoeste Amazônico (Absy et al., 1991; Sifeddine et al., 1994; Van der Hammen e Absy, 1994; Meneses et al., 2012). Esses dados palinológicos mostram que a rápida mudança de ambiente teve uma contribuição significativa para a redução gradativa dos táxons, a qual, aliada a fatores como patógenos, pressão de caça humana ou combinação desses fatores, resultou na extinção da megafauna pleistocênica no Sudoeste Amazônico (Cartelle, 1999; Reumer, 2007).

De acordo com Araújo-Júnior et al. (2012), os táxons do Pleistoceno Final registrados para a localidade de Araras são: *Eremotherium laurillardii*, Megalonychidae indet., *Glyptodon clavipes*, *Sclerocalyptus*, *Holmesina*, *Toxodon* aff. *Todoxon platensis*, *Trigodonops lopesi*, Toxodontinae indet., *Notiomastodon platensis*, Cervidae indet., Tayassuidae indet., *Tapirus rondoniense*, *Tapirus terrestris*, *Neochoceros* aff. *Neochoceros sulcidens*, *Trichechus*, *Phractocephalus*, *Inia*, Chelidae cf. *Geochelone*. A localidade de Araras foi selecionada em função de sua representatividade fóssil e de estudos anteriores associados aos aspectos tafonômicos e taxonômicos de vertebrados pleistocênicos (Cozzuol e Silva, 1996; Cozzuol, 1999; Nascimento et al., 2003, 2005; Holanda et al., 2004; Porto et al., 2004a, 2004b; Cozzuol et al., 2005; Hsiou et al., 2007; Figueiredo e Nascimento, 2008; Nascimento, 2008; Nascimento et al., 2010a, 2010b; Santos et al., 2011; Araújo-Júnior et al., 2012; Cozzuol et al., 2013).

ESTUDOS MICROSCÓPICOS E QUÍMICOS EM VERTEBRADOS PLEISTOCÊNICOS

Na América do Sul, são escassos os trabalhos relacionados aos aspectos microscópicos e químicos em vertebrados do

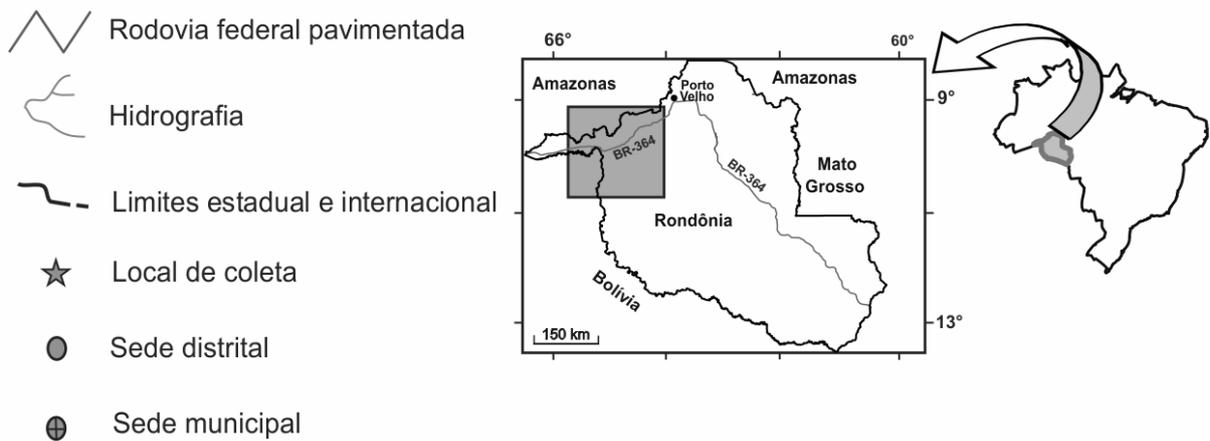
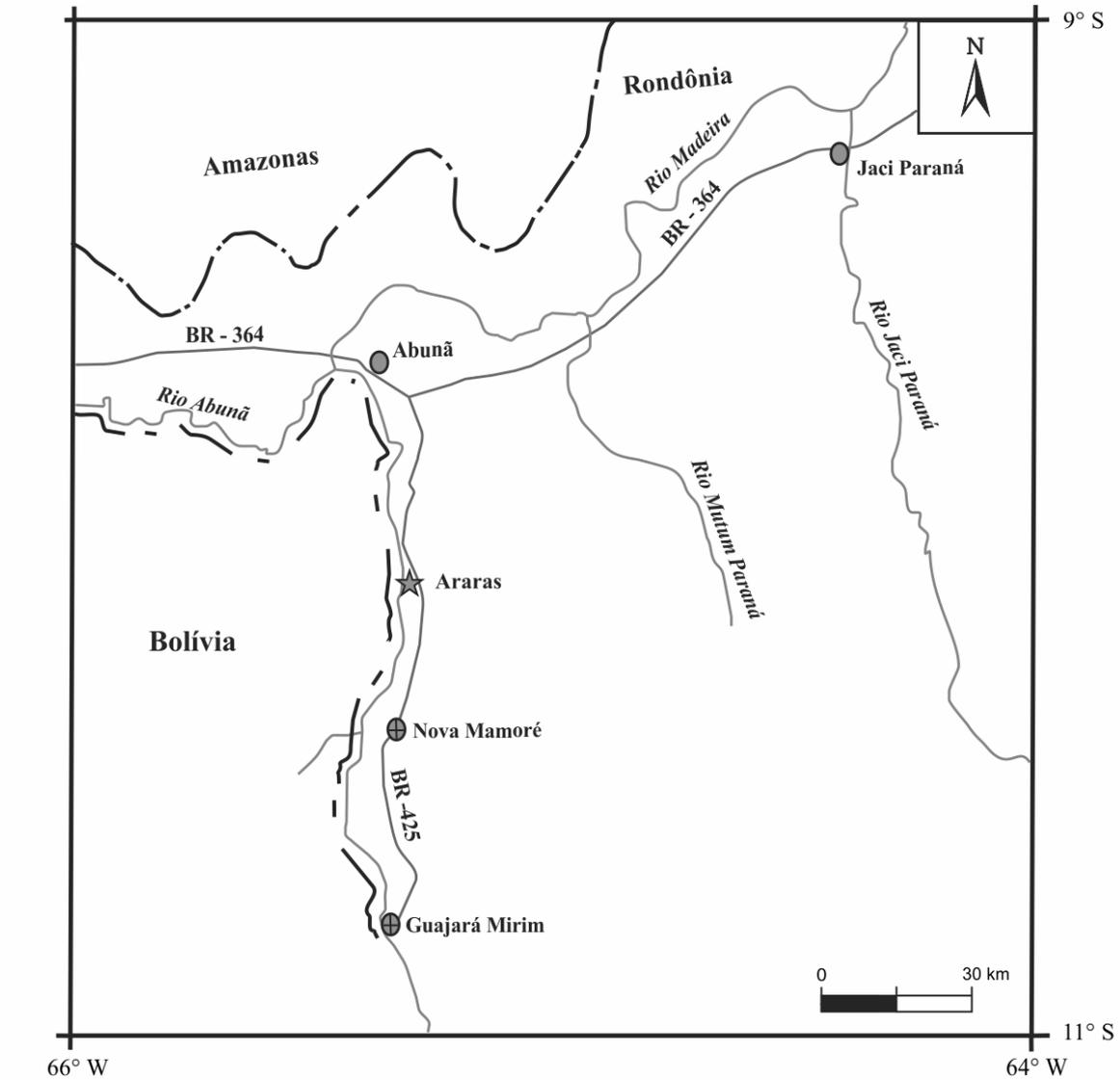


Figura 1. Localização da área de estudo (localidade de Araras, município de Nova Mamoré, Rondônia, Brasil).

Pleistoceno, envolvendo a preservação microestrutural e a fossilização, como exemplo na Argentina (Tomassini et al., 2015) e na região Nordeste do Brasil (Santos et al., 2002; Alves et al., 2007; Ribeiro, 2010; Araújo-Júnior et al., 2013a, 2013b).

Outros estudos envolvendo vertebrados pleistocênicos tratam de alterações microestruturais. Cook et al. (1962), que por meio da petrografia e micrografias de raios-X compararam microestruturas em ossos de diferentes idades,

dentre esses, mamutes do Pleistoceno (*M. primigenius*) da camada *permafrost* do Alasca e o elefante asiático atual (*E. indicus*). O estudo revelou que, mesmo em diferentes idades e ambientes, ambos preservaram suas microestruturas ósseas. Garland (1987, 1989) correlaciona a aparência amorfa negra à matéria orgânica dos próprios ósteons; da mesma forma, Gupta et al. (2006) a relaciona aos componentes ósseos originais do organismo.

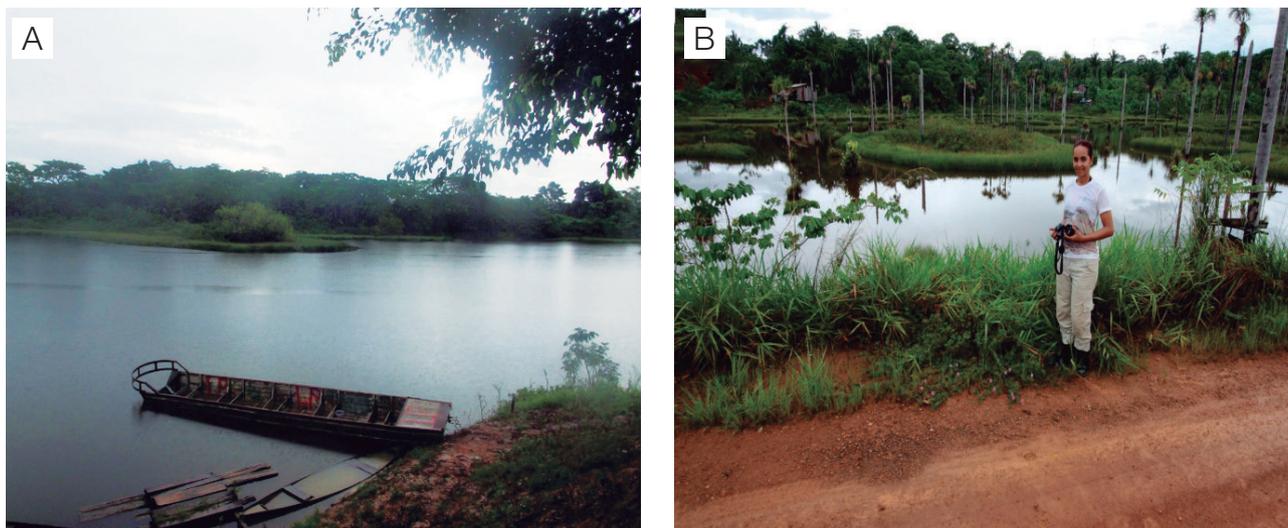
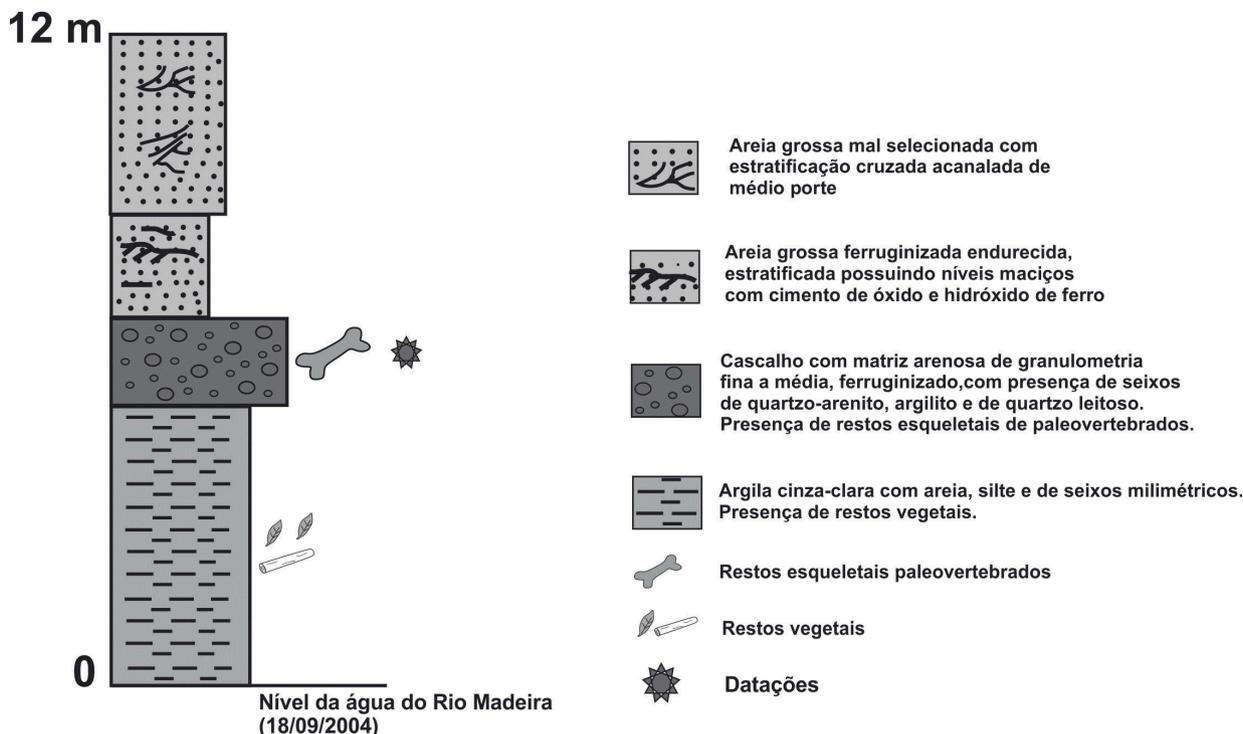


Figura 2. (A e B) Atuais cavas alagadas de garimpo, representando locais de coleta de vertebrados pleistocênicos nos anos de 1970 a 1990. Localidade de Araras, município de Nova Mamoré, Rondônia.



Fonte: modificado de Quadros et al. (2006).

Figura 3. Representação esquemática da seção-tipo da Formação Rio Madeira onde foram coletados os restos de vertebrados pleistocênicos, localidade de Araras, Rondônia.

Cook et al. (1962) relataram, ainda, a ocorrência de microfissuras radiais em ossos de *M. columbi* do Pleistoceno, estendendo-se em três direções dentro dos limites periféricos do sistema de Havers. Pfretzschner (2000), ao estudar lâminas delgadas de *Equus sp.* e *Mammuthus sp.*, do Pleistoceno, relatou microfissuras radiais ao longo da secção transversal do osso. Rogoz et al. (2012) também descreveram microfissuras em ossos de *M. primigenius* em contexto arqueológico do Paleolítico Superior. Em ambos os casos, as microfissuras são atribuídas às alterações diagenéticas (Jans et al., 2002; Rogoz et al., 2012).

MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras analisadas correspondem a cinco restos esqueléticos de indivíduos do Pleistoceno de Araras, Rondônia, provenientes da coleção do Serviço Geológico do Brasil-CPRM, em Porto Velho. Os estudos sistemáticos basearam-se nos trabalhos de Roth (1898), Paula Couto (1979) e Cartelle (1992), além de comparações com outros espécimes da própria coleção.

Para os estudos microscópicos, foram confeccionadas lâminas delgadas dos restos esqueléticos, em cortes transversais e longitudinais. Foi utilizado o método da impregnação a vácuo, que é caracterizado pelo fechamento dos interstícios das amostras, aumentando a resistência dos materiais ao corte e à abrasão, evitando a perda da lâmina no acabamento final (Souza e Di Domenico, 2012). As lâminas delgadas foram analisadas com o auxílio da lupa binocular do Laboratório de Geociências, da Universidade Federal de Rondônia (UNIR), e do microscópio petrográfico *Olympus BX51*, do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), com aumentos variando de 2 a 40x sob luz normal e polarizada. Para o detalhamento desses estudos microscópicos e das análises químicas, utilizou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) *Fei Quanta 250* com Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS), do Laboratório de Técnicas Mineralógicas da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), em Manaus.

Para a análise no MEV, as lâminas delgadas foram metalizadas com película de ouro de 100 Å de espessura e analisadas no modo de elétrons retroespalhados, fornecendo uma imagem mais detalhada quanto à heterogeneidade da composição química de cada amostra. As imagens foram geradas pelo software *xT Microscope Control* com voltagens de 15 a 25 kV, evitando a desintegração do carbono. Os aumentos variaram entre 100 a 3.000x. Os elementos químicos foram quantificados pelo software *Edax Genesis* e foi aplicada a correção ZAF para cada elemento, gerando mapas de distribuição obtidos de cada *spot* da amostra analisada.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os estudos sistemáticos realizados nos restos esqueléticos pleistocênicos da localidade de Araras, Formação Rio Madeira,

revelam indivíduos de Megatheriidae e Toxodontidae, com as seguintes características: CPRM-42, centro de vértebra torácica de Megatheriidae de cor marrom, formato triangular e restos de corpo vertebral, sugerindo pertencer a um indivíduo juvenil; CPRM-13, fragmento da epífise proximal de tíbia esquerda de Megatheriidae de coloração marrom e bege, moderada abrasão, epífise não fusionada, sugerindo pertencer a um indivíduo juvenil; CPRM-7, epífise distal de fêmur esquerdo de Toxodontidae de coloração marrom, formato achatado, possui apenas um côndilo articular; CPRM-23, elemento ósseo atribuível a uma falange de coloração cinza escuro, com apenas a porção articular; CPRM-SN1, elemento ósseo indeterminado de coloração cinza escuro, com morfologia alterada (Figura 4).

As características morfológicas dos restos ósseos das amostras CPRM-13 e CPRM-42 estão de acordo com os critérios de Paula Couto (1979) e Cartelle (1992) para Megatheriidae. No caso de *E. laurillardii*, por exemplo, a vértebra torácica apresenta formato triangular (em vista cranial) e a tíbia possui a face caudal rugosa e transversalmente convexa, sendo que as faces proximais e distais são um tanto côncavas e robustas (Cartelle, 1992). Além disso, ocorrências anteriores de Megatheriidae para a localidade de Araras (Nascimento et al., 2003; Porto et al., 2004a, 2004b; Nascimento, 2008; Santos et al., 2011; Araújo-Júnior et al., 2012), aliadas às

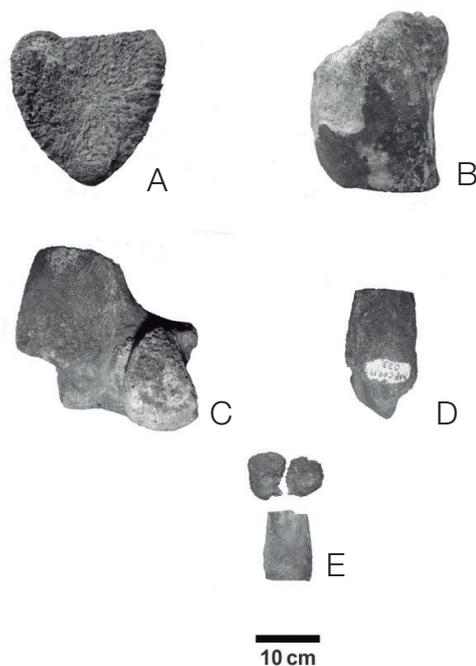


Figura 4. Restos esqueléticos de indivíduos do Pleistoceno da localidade de Araras, Formação Rio Madeira, Rondônia. (A) Vista cranial do centro de vértebra torácica de Megatheriidae (CPRM-42); (B) vista lateral da epífise proximal da tíbia esquerda de Megatheriidae (CPRM-13); (C) vista posterior da epífise distal de fêmur esquerdo de Toxodontidae (CPRM-7); (D) vista dorsal da falange (CPRM-23); (E) CPRM-SN1. Indeterminado.

comparações com exemplares de vértebra e tibia da própria coleção da CPRM, permitiram classificar os restos esqueléticos CPRM-13 e CPRM-42 nessa família. Já a epífise distal do fêmur esquerdo (amostra CPRM-7) está em conformidade com as descrições de Roth (1898), sendo que o fêmur de *Toxodontidae* (em vista posterior) é estreito, achatado e com os côndilos distais (e proximais) arredondados, semelhante ao espécime CPRM-7. As ocorrências de toxodontídeos na localidade de Araras (Nascimento et al., 2003; Nascimento, 2008; Santos et al., 2011; Araújo-Júnior et al., 2012) e as comparações com restos esqueléticos da coleção da própria CPRM permitem a classificação do espécime CPRM-7 na família *Toxodontidae*. Ressalta-se que o grau de fragmentação dos espécimes referidos impossibilita uma classificação taxonômica mais precisa.

Esses estudos confirmam a ocorrência de *Megatheriidae* e de *Toxodontidae* em depósitos fluviais pleistocênicos do Rio Madeira, na localidade de Araras, citada em estudos anteriores (Santos et al., 2011; Araújo-Júnior et al., 2012). Os achados de *Megatheriidae* englobam indivíduos principalmente

do Pleistoceno e Holoceno das Américas do Sul, Central e do Norte, com achados em quase todos os Estados do Brasil (Cartelle e De Iullis, 1995). Os *Toxodontidae* são notoungulados nativos da América do Sul, de grandes dimensões corpóreas. O registro de *Toxodontidae* abrange do Pleistoceno Médio ao Pleistoceno Tardio, com numerosas ocorrências na América do Sul (Bond et al., 1995; Miño-Boilini et al., 2006) e achados em muitos Estados brasileiros (Mendonça, 2007). A ocorrência de indivíduos de *Megatheriidae* e *Toxodontidae* sugere um ambiente de campos abertos e florestas, além de planícies com vegetação rasteira e muita água perene, respectivamente (MacFadden, 2005; Dantas et al., 2013).

As observações microscópicas evidenciaram a ocorrência de degradação óssea constituída por uma matriz amorfa negra associada às trabéculas (CPRM-42) ou às microestruturas, como em canais de Havers e Volkmann (CPRM-13). As análises mostram o carbono como constituinte químico predominante da matriz amorfa negra, com teores de até 90,19% (Figuras 5 e 6, Tabela 1).

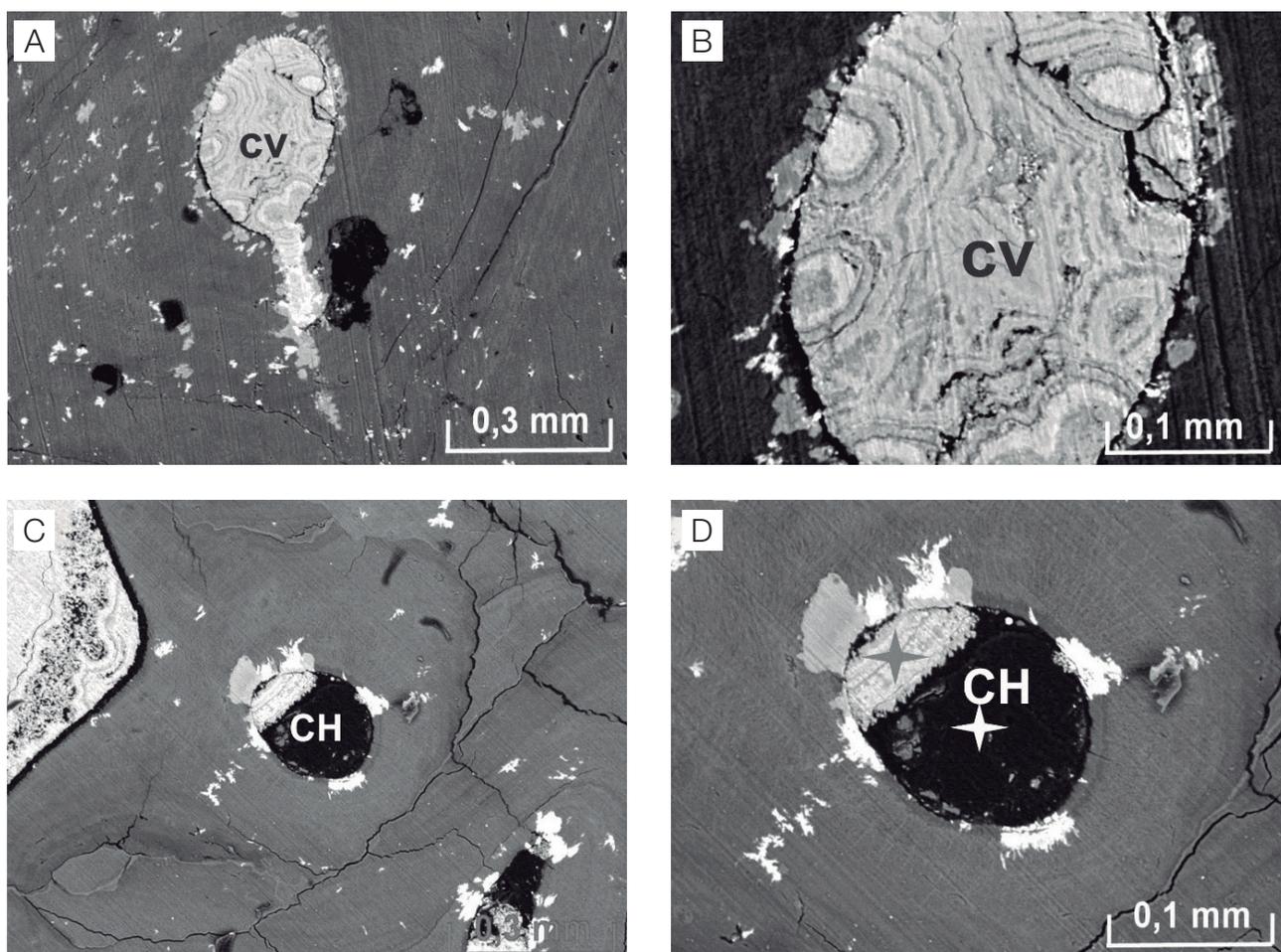


Figura 5. Imagens obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura mostrando a presença de ferro e carbono nas microestruturas ósseas (amostra CPRM-13). (A e B) Canal de Volkmann (CV) preenchido por ferro (porção cinza clara); (C) Canal de Havers (CH) preenchido predominantemente por carbono (porção negra) e ferro (porção cinza clara). D. Estrela cinza = 10,99% de carbono. Estrela branca = 90,19% de carbono (Figura 6).

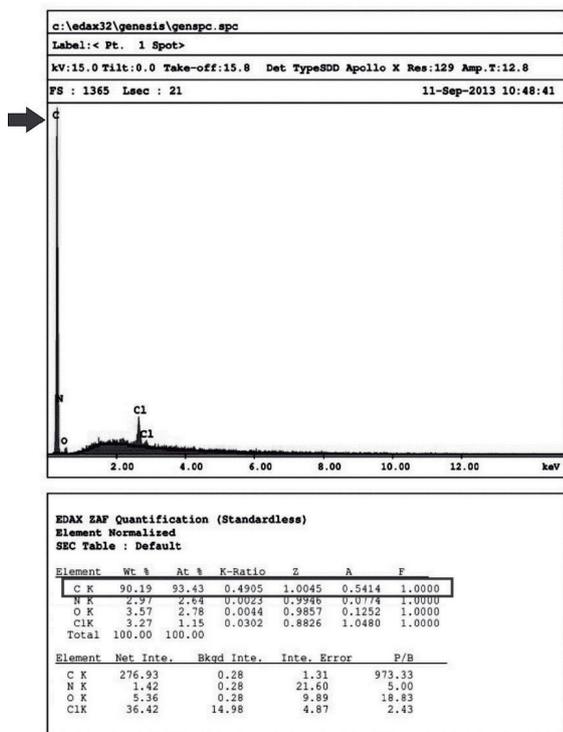


Figura 6. Gráfico gerado da amostra CPRM-13 obtido no Espectrômetro de Energia Dispersiva. Dados referentes à estrela branca da Figura 5D.

É provável que a origem da matriz amorfa negra nas porções escuras das microestruturas ósseas, refletidas na coloração escura dos elementos esqueléticos, seja resultante dos próprios osteons, já que foi observada a aparência amorfa negra em situações *post mortem* e pós-soterramento em osteons de indivíduos pleistocênicos (Cook et al., 1962; Garland, 1987, 1989). Além disso, Schweitzer (2011) menciona a possibilidade de associação da matriz de coloração negra à presença de carbono da matéria óssea original.

Nesse sentido, os resultados obtidos no EDS mostram percentuais de componentes químicos oriundos da matéria óssea original (Tabela 1), os quais podem ter se concentrado na própria matriz óssea e no Canal de Havers, após a morte dos indivíduos estudados. Nessa situação, os processos que levariam à degradação óssea foram desacelerados ou retidos (Schweitzer, 2011). Enriquecimentos de carbono podem estar associados à desidratação e ao empobrecimento de materiais voláteis do colágeno correlato ao ambiente redutor, além do aumento de temperatura, pressão e pH em função da carga dos sedimentos subjacentes aos restos esqueléticos (Pardo, 1996). Além disso, nesse caso, o ambiente fluvial pode ter contribuído para a preservação de compostos de nitrogênio do osso original (Doberenz e Matter, 1965).

A degradação histológica óssea, no processo de fossilização, foi observada em diferentes estágios, variando de muito bem preservado, como no caso da tíbia de *Megatheriidae*

Tabela 1. Dados químicos detalhados das amostras CPRM-13 e CPRM-42 obtidos no Espectrômetro de Energia Dispersiva.

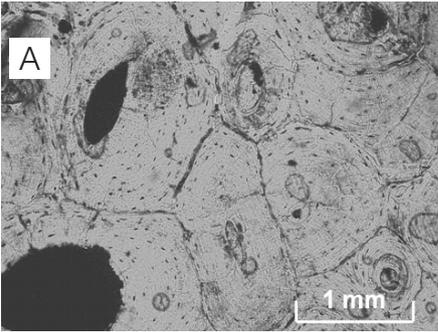
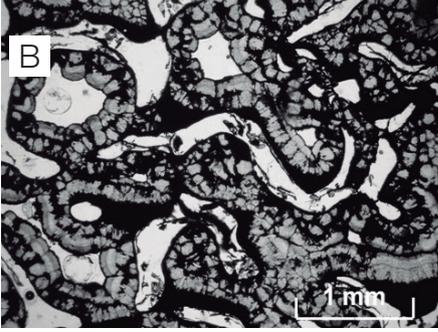
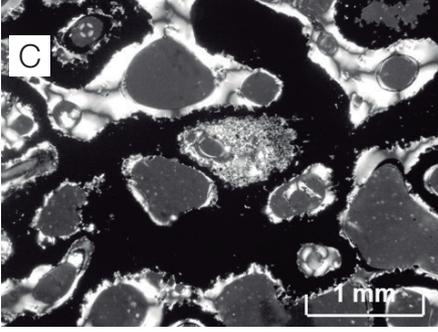
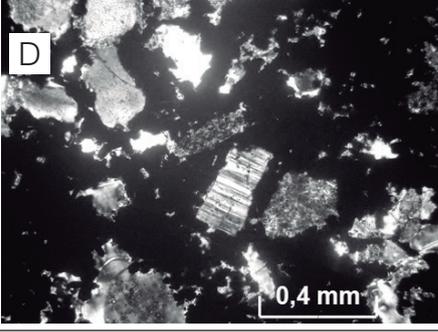
Amostras	Materiais analisados	Aumentos	kV	Elementos químicos	Porcentagem em peso (%)	Erro estático relativo*
CPRM-13	Matriz amorfa negra no canal de Havers.	533 X	15	C	85,23	0,68
				N	10,60	6,54
				O	4,14	6,28
CPRM-13	Matriz amorfa negra no canal de Havers.	1.000 X	15	C	90,19	1,31
				N	2,97	21,60
				O	3,57	9,89
				Cl	3,27	4,87
CPRM-13	Porção cinza clara no canal de Havers.	1.000 X	15	C	10,99	3,22
				N	2,29	8,55
				O	42,49	0,89
				Ca	0,38	15,35
				Mn	11,29	2,17
				Fe	32,56	1,34
CPRM-13	Porção cinza clara no canal de Volkmann.	500 X	15	C	13,60	2,35
				N	2,31	6,86
				O	38,67	0,80
				Mg	0,55	15,49
				Ca	0,29	16,21
				Mn	3,56	3,66
				Fe	41,02	0,99
CPRM-42	Matriz amorfa negra preenchendo formas preservadas de trabéculas.	597 X	20	C	53,91	1,88
				O	40,31	2,16
				Mg	0,30	25,00
				Al	0,65	9,49
				Si	2,21	3,70
				Ca	0,27	11,23
				Fe	2,36	4,66

*Erro estático relativo, referente à intensidade dos picos para cada elemento expresso na forma de desvio padrão.

(CPRM-13), a muito mal preservado, como a amostra CPRM-SN1 (Tabela 2). Quando a amostra está bem preservada, como a CPRM-13, é possível distinguir facilmente suas microestruturas ósseas e a ocorrência da matriz amorfa

negra restrita nos canais de Havers e Volkmann, como o início da degradação óssea pelo processo de fossilização associado ao carbono. É possível identificar na amostra CPRM-13 o sistema ósseo secundário na porção compacta

Tabela 2. Comparação dos diferentes estágios de degradação óssea histológica em vertebrados pleistocênicos da Formação Rio Madeira, incluindo fotomicrografias das amostras CPRM-13, CPRM-23, CPRM-42 e CPRM-SN1.

Nível de preservação	Fotomicrografia	Descrição
Bem preservado (Amostra CPRM-13)		Porção compacta óssea, com sistema ósseo secundário. Apresenta matriz amorfa negra constituída de teores com até 90,19% de carbono, restrita aos canais de Havers e Volkmann. São identificados osteons, linhas cimentantes, lamelas circunferenciais, lacunas dos osteócitos e canalículos.
Médio (Amostra CPRM-23)		Porção compacta óssea com os componentes microestruturais ósseos em fase de degradação, restando o arranjo das trabéculas (porção esponjosa). A matriz amorfa negra situa-se nas paredes das trabéculas ósseas. Não é possível identificar microestruturas.
Mal preservado (Amostra CPRM-42)		Avanço da degradação da porção compacta e esponjosa. Trabéculas ósseas com elevado grau de degradação constituídas predominantemente pela matriz amorfa negra. Ainda preserva a forma das trabéculas.
Muito mal preservado (Amostra CPRM-SN1)		Total degradação das porções compacta e esponjosa do osso, predominando a matriz amorfa sem distinção de constituintes histológicos ósseos. Não preserva forma das trabéculas. Cristais de quartzo, plagioclásio, óxidos e hidróxidos de ferro preenchem finos interstícios da amostra.

do osso, consistindo no arranjo lamelar das fibras colágenas, ósteons, canais vasculares de Havers e de Volkmann, lamelas circunferenciais, lacunas dos osteócitos e canaliculos (Tabela 2A e Figura 7A).

Nas porções mais bem preservadas dos ósteons secundários da amostra CPRM-13, são identificados três tipos distintos de microfissuras (Figuras 7 e 8), representantes de descontinuidades ósseas relacionadas a processos diagenéticos complexos, como mencionados por Pfretzschner (2000) e Cook et al. (1962). Dessa forma, as microfissuras ósseas indicam situações de *post mortem* (disposição radial e sem o preenchimento da matriz amorfa negra) (Figuras 6A e 7E); pós-soterramento (de maior espessura e cortando ósteons) (Figuras 6B e 7F); e

de pós-fossilização (cortando a matriz amorfa negra dos canais de Havers ou de Volkmann) (Figuras 5A, 5B, 6C e 7G). As microfissuras podem ter propiciado o avanço do processo de degradação do osso compacto com a ação das intempéries nas porções ósseas internas (Pfretzschner, 2000, 2004; Pfretzschner e Tütken, 2011).

No caso das microfissuras radiais, elas podem constituir caminhos adicionais que favorecem a mobilização de fluidos por difusão na zona do osso compacto, melhorando o intercâmbio de íons, além de sugerir um ambiente exposto a eventos de inundação (Pfretzschner, 2000, 2004; Pfretzschner e Tütken, 2011). Já as microfissuras pós-soterramento, causadas por estresses físicos ou provenientes da manipulação durante a escavação do resto

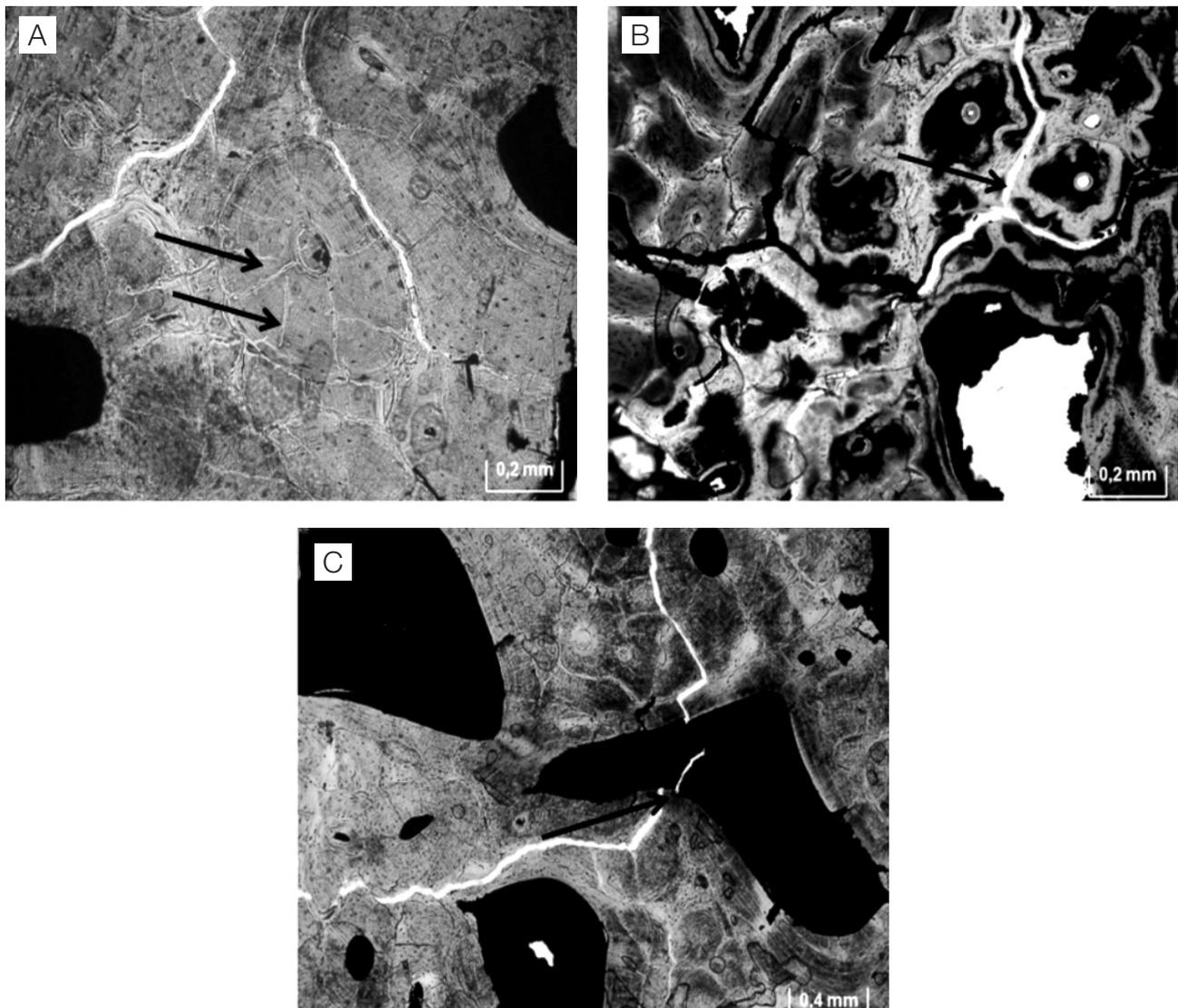


Figura 7. Fotomicrografias mostrando três tipos distintos de microfissuras encontradas na amostra CPRM-13, indicadas pelas setas. (A) Microfissuras radiais sem a matriz amorfa negra (*post mortem*); (B) microfissuras cortando os ósteons, mais espessas (pós-soterramento); (C) microfissura cortando a matriz amorfa negra (pós-fossilização).

esqueletal (Grupe e Dreses-Werringloer, 1993), resultam do colapso de trabéculas, dada a ausência de material de preenchimento das cavidades de porções da amostra. As microfissuras pós-fossilização, de arranjo multidirecional, resultam possivelmente da pressão externa das camadas de sedimento sobre o resto esquelético (Pardo, 1996).

Quando em estágio de elevada degradação óssea, as amostras apresentam apenas restos de trabéculas alterados, como no caso das amostras CPRM-42 e CPRM-23, representando as microestruturas ósseas ou, ainda, somente a matriz amorfa negra disseminada quando em total degradação (CPRM-SN1).

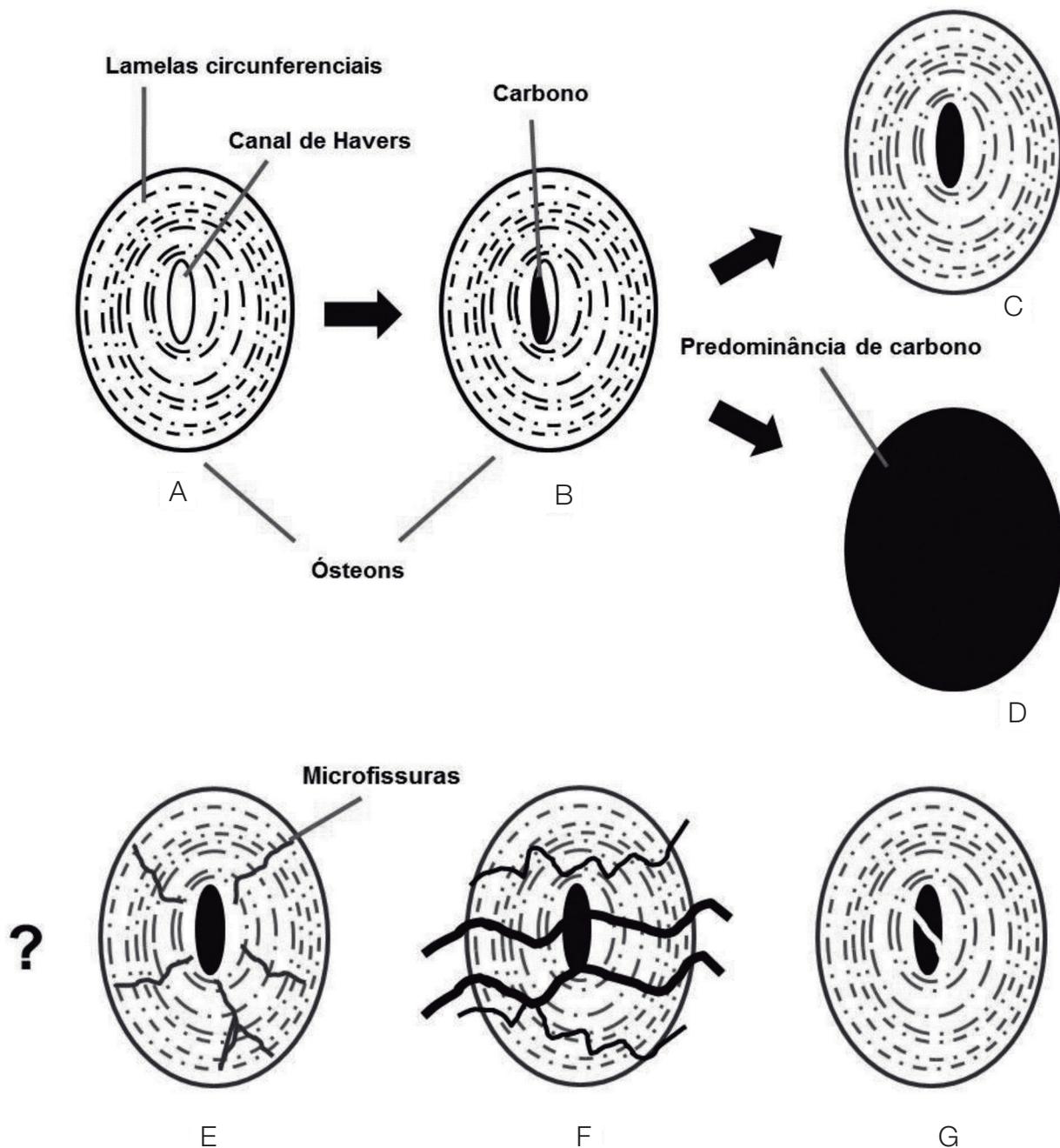


Figura 8. Desenho esquemático ilustrando os estágios de degradação histológica no processo de fossilização dos vertebrados pleistocênicos de Araras. Ósteon secundário com suas lamelas circunferenciais e canal de Havers (A e B). A fossilização associada ao carbono pode preservar ou não os microconstituintes ósseos, resultando no caminho C ou D. Inclui também presença de ósteon com predominância de carbono (D), bem como microfissuras *post mortem* (E), pós-soterramento (F) e pós-fossilização (G). A interrogação indica a possibilidade de ocorrer microfissuras distintas.

CONCLUSÕES

As análises microscópicas e químicas evidenciaram o processo de fossilização com o carbono predominante nos restos esqueléticos dos vertebrados pleistocênicos da Formação Rio Madeira, localidade de Araras, Rondônia, Sudoeste Amazônico. A presença de indivíduos de Megatheriidae e Toxodontidae amplia o número de ocorrência desses táxons e sugere um paleoambiente durante o Pleistoceno Final da Formação Rio Madeira, constituído por campos abertos e florestas, além de planícies de inundação.

Nesse processo de fossilização, o carbono atuou inicialmente em porções compactas ósseas, alterando suas microestruturas e, em seguida, degradou porções esponjosas dos ossos, resultando em uma aparência amorfa negra. Esse processo gerou diferentes estágios de degradação microestrutural, sendo possível, em alguns casos, identificações histológicas detalhadas (CPRM-13) e, em outros, de total degradação, ocorre somente a matriz amorfa negra disseminada (CPRM-SN1).

As condições de eventos diagenéticos dos sedimentos da Formação Rio Madeira proporcionaram a geração de microfissuras ao longo da matriz óssea, importantes em processos de troca de fluidos e com provável contribuição para o aumento da degradação microestrutural óssea. São três tipos distintos que indicam situações de *post mortem* (radiais), pós-soterramento (cortando os osteons) e pós-fossilização (cortando a matriz amorfa negra dos canais de Havers ou de Volkmann).

A escassez na literatura sobre o processo de fossilização correlacionada ao carbono em vertebrados do Pleistoceno Final do Sudoeste Amazônico pode ser atribuída à carência de estudos que utilizam técnicas de microscopia (MEV e petrografia) e análise química (EDS). Como demonstrado neste estudo, essas técnicas contribuem significativamente para a detecção de tipos de fossilização, dentre esses, o processo aqui discutido, além de características microestruturais e diagenéticas.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de mestrado concedida à primeira autora, ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente da Universidade Federal de Rondônia (UNIR); ao Grupo de Pesquisa Geociências (UNIR), ao Serviço Geológico do Brasil, unidade Porto Velho (RO) e à equipe do Laboratório de Técnicas Mineralógicas da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), pelo auxílio na realização das análises no MEV. Aos revisores anônimos que contribuíram para a melhoria do manuscrito

REFERÊNCIAS

- Absy, M. L., Cleef, A., Fournier, M., Martin, L., Servant, M., Sifeddine, A., Silva, M. F., Soubiès, F., Suguio, K., Turcq, B., Van der Hammen, T. (1991). Mise en évidence de quatre phases d'ouverture de la forêt dense dans le sud-est de l'Amazonie au cours des 60.000 dernières années. Première comparaison avec d'autres régions tropicales. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 312(2), 673-678.
- Alves, R. S., Barreto, A. M., Borges, L. E. P., Farias, C. C. (2007). Aspectos tafonômicos no depósito de mamíferos pleistocênicos de Brejo da Madre de Deus, Pernambuco. *Estudos Geológicos*, 17(2), 114-122.
- Andrade, L. C., Nascimento, E. R., Tizuka, M. M., Kipnis, R. (2010). Primeira ocorrência da família Alligatoridae (Crocodylia) em depósitos fluviais do Rio Madeira, Porto Velho, RO. *VII Simpósio Brasileiro de Paleontologia de Vertebrados*, 72. Rio de Janeiro: SBP.
- Araújo-Júnior, H. I., Bissaro Júnior, M. C., Santos, T. T., Alves, R. S., Bergqvist, L. P. (2012). Tafonomia da megafauna pleistocênica brasileira: *Fluvial Transport Index* (FTI) em análises de representatividade óssea. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 15, 95-104.
- Araújo-Júnior, H. I., Porpino, K. O., Bergqvist, L.P. (2013a). Taphonomic analysis of a Late Pleistocene vertebrate accumulation from Lage Grande Paleontological Site, Pernambuco State, Northeastern Brazil: New remarks on preservational aspects of tank deposits. *Quaternary International*, 317, 88-101.
- Araújo-Júnior, H. I., Porpino, K. O., Ximenes, C. L., Bergqvist, L. P. (2013b). Unveiling the taphonomy of elusive natural tank deposits: a study case in the Pleistocene of northeastern Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 378, 52-74.
- Bond, M., Cerdeño, E., López, G. (1995). Los ungulados nativos de América del Sur. In: M. T. Alberdi, G. Leone, E. P. Tonni (Eds.), *Evolución biológica y climática de la Región Pampeana durante los últimos cinco millones de años: un ensayo de correlación con el Mediterráneo occidental* (v. 12, 257-275). Monografías del Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid: Museo Nacional de Ciencias Naturales.
- Cartelle, C. (1992). *Edentata e megamamíferos herbívoros extintos da Toca dos Ossos (Ouro-lândia, Bahia, Brasil)*. Tese (Doutorado). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.

- Cartelle, C. (1999). Pleistocene mammals of the cerrado and caatinga of Brazil. In: J. F. Eisenberg, K. H. Redford (Eds.), *Mammals of the Neotropics: the Central Neotropics* (27-46). Chicago: University of Chicago Press.
- Cartelle, C., De Iuliis, G. (1995). *Eremotherium laurillardi*: the Panamerican Late Pleistocene megatheriid sloth. *Journal of Paleontology*, 15, 830-841.
- Cook, S. D., Brooks, S. T., Ezra-Cohn, H. E. (1962). Histological studies on fossil bone. *Journal of Paleontology*, 36(3), 483-494.
- Costa, M. L. (2002). Mineralização de fragmentos de tecidos ósseos de sedimentos da Bacia do Acre. In: E. L. Klein, M. L. Vásquez, L. T. Rosa-Costa (Eds.), *Contribuições à Geologia da Amazônia* (301-318). Belém: SBG.
- Cozzuol, M. A. (1999). Mamíferos acuáticos y la antigüedad de los depósitos cuaternários del Alto Rio Madeira (Rondônia, Brasil). *Congreso Evolución Neotropical del Cenozoico*, 18. La Paz, Bolivia.
- Cozzuol, M. A., Clozato, C. L., Holanda, E. C., Rodrigues, F. H. G., Nienow, S., De Thoisy, B., Redondo, R. A. F., Santos, F. R. (2013). A new species of tapir from the Amazon. *Journal of Mammalogy*, 94, 1331-1345.
- Cozzuol, M. A., Holanda, E. C., Nascimento, E. R., Weiss, F. E. (2005). Registro do gênero *Neochœrus* (Rodentia, Caviomorpha, Hydrochoeridae) para o Pleistoceno Superior da Amazônia Sul-Occidental. *Paleo*, p. 43-44, Porto Alegre: SBP.
- Cozzuol, M. A., Silva, S. A. F., Nascimento, E. R., Holanda, E. C. (2006). Registros de vertebrados para o Cenozoico Superior da Amazônia Occidental: idade, paleoambiente e relações paleobiogeográficas. *V Simpósio Brasileiro de Paleontologia de Vertebrados*. Santa Maria: SBP.
- Cozzuol, M. A., Silva, V. M. F. (1996). Un registro de *Inia* sp. fósil del Pleistoceno Tardio-Holoceno del Alto Rio Madeira, Rondonia, Brasil. *VII Reunión de Trabajos de Especialistas en Mamíferos Acuáticos de America del Sur*. Viña del Mar, Chile.
- Cuezva, S., Élez, J. (2000). Reconocimiento del estadio de desarrollo en la microestructura de los huesos fósiles de mamíferos (Somosaguas y Layna). *Coloquios de Paleontologia*, 51, 159-174.
- Da Rosa, A. A. S., Leal, L. A., Pires, E. F., Meneses, M., Sayão, J. M. (2012). Datação de depósitos sedimentares do Rio Madeira na região de abrangência do AHE Jirau, Rondônia, norte do Brasil. *XLVI Congresso Brasileiro de Geologia*. Santos: SBG.
- Dantas, M. A. T., Dutra, R. P., Cherkinsky, A., Fortier, D. C., Kamino, L. H., Cozzuol, M. A., Ribeiro, A. S., Vieira, F. S. (2013). Paleoecology and radiocarbon dating of the Pleistocene megafauna of the Brazilian Intertropical Region. *Quaternary Research*, 79, 61-65.
- Doberenz, A., Matter, P. (1965). Nitrogen analyses of fossil bones. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 16, 253-258.
- Figueiredo, A. E. Q., Nascimento, E. R. (2008). Análises preliminares de aspectos tafonômicos da fauna de vertebrados da Formação Rio Madeira, Rondônia, Brasil. *Congreso Latinoamericano de Paleontologia de Vertebrados*, 92. Neuquén: Universidad Nacional del Comahue.
- Fortier, D., Nascimento, E. R., Holanda, E. C. (2007). Sobre um crocodilo da Formação Rio Madeira (Pleistoceno Superior, Rondônia): descrição e análises filogenéticas preliminares. *X Simpósio de Geologia da Amazônia*. Porto Velho.
- Garland, A. N. (1987). A histological study of archaeological bone decomposition. In: A. Boddington, A. N. Garland, R. C. Janaway (Eds.), *Death, Decay and Reconstruction: approaches to archaeology and forensic science* (109-126). Manchester: University Press.
- Garland, A. N. (1989). Microscopical analysis of fossil bone. *Applied Geochemistry*, 4, 215-229.
- Góis, F., Nascimento, E. R., Porto, A. S., Holanda, E. C., Cozzuol, M. A. (2004). Ocorrências de Cingulata dos gêneros *Kraglievichia* e *Holmesina* do Terciário e Quaternário da Amazônia Sul-Occidental. *XX Jornadas Argentinas de Paleontologia de Vertebrados*. La Plata.
- Góis, F., Scillicato-Yané, G. J., Carlini, A. A., Ubilla, M. (2012). Una nueva especie de *Holmesina* Simpson (Xenarthra, Cingulata, Pampatheriidae) del Pleistoceno de Rondônia, Sudoeste de la Amazonia, Brasil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 15(2), 211-227.
- Grupe, G., Dreses-Werringloer, U. (1993). Decomposition phenomena in thin sections of excavated human bone. In: G. Grupe, A. N. Garland (Eds.), *Histology of ancient human bone: methods and diagnosis* (27-36). Berlin: Springer-Verlag.
- Gupta, N. S., Michels, R., Briggs, D. E. G., Evershed, R. P., Pancost, R. D. (2006). The organic preservation of fossil arthropods: an experimental study. *Proceedings of Royal Society B*, 273, 2777-2783.
- Holanda, E. C., Cozzuol, M. A. (2006). New records of *Tapirus* from the Late Pleistocene of Southwestern Amazonia. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 9, 193-200.

- Holanda, E. C., Ferigolo, J., Ribeiro, A. M. (2011). New *Tapirus* species (Mammalia: Perissodactyla: Tapiridae) from the upper Pleistocene of Amazonia, Brazil. *Journal of Mammalogy*, 92(1), 111-120.
- Holanda, E. C., Porto, A. S., Nascimento, E. R., Gois, F., Cozzuol, M. A. (2004). Registros do gênero *Tapirus* (Mammalia, Perissodactyla) do Pleistoceno da Amazônia Sul-Occidental. *XX Jornadas Argentinas de Paleontologia de Vertebrados*. La Plata.
- Hsiou, A., Maciente, A., Holanda, E. C., Nascimento, E. R. (2007). Novos registros de Siluriformes e Testudines para a Formação Rio Madeira, Pleistoceno Superior, Estado de Rondônia, Brasil. *XX Congresso Brasileiro de Paleontologia*. Búzios: SBP.
- Jans, M. M. E., Kars, H., Nielsen-Marsh, C. M., Smith, C. I., Nord, A. G., Arthur, P., Earl, N. (2002). In situ preservation of archaeological bone: a histological study within a multidisciplinary approach. *Archaeometry*, 44(3), 343-352.
- MacFadden, B. J. (2005). Diet and habitat of toxodont megaherbivores (Mammalia, Notoungulata) from the late Quaternary of South and Central America. *Quaternary Research*, 64, 113-124.
- Mendonça, R. (2007). *Revisão dos toxodontes pleistocênicos brasileiros e considerações sobre Trigodonops lopesi (Roxo, 1921) (Notoungulata, Toxodontidae)*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Biociências – USP.
- Meneses, M. E. N. S., Pires, E. F., Da Rosa, A. A. S., Leal, L. A., Mendes, L. A. S., Paula, M. J., Souza, F. E. F., Benício, J. R. W., Campos, L. S. (2012). Registro palinológico de depósitos sedimentares neopleistocênicos do Rio Madeira, Rondônia, Amazônia Brasileira. *Revista do Instituto Geológico*, 33(2), 41-48.
- Miño-Boilini, A. R., Cerdeño, E., Bond, M. (2006). Revisión del género *Toxodon* Owen, 1837 (Notoungulata: Toxodontidae) en el Pleistoceno de las provincias de Corrientes, Chaco y Santa Fe. *Revista Española de Paleontología*, 21(2), 93-103.
- Mörner, N. A., Rossetti, D., Toledo, P. M. (2001). The Amazonian rainforest only some 6-5 million years old. In: I. C. G. Vieira, J. M. C. Silva, D. C. Oren, M. A. D'Incao (Eds.), *Diversidade biológica e cultural da Amazônia* (3-18). Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi.
- Nascimento, E. R. (2008). *Os Xenarthras Pilosa (Megatheriidae), Notoungulata (Toxodontidae) e Proboscidea (Gomphotheriidae) da Formação Rio Madeira, Pleistoceno Superior, estado de Rondônia, Brasil*. Dissertação (Mestrado). Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Nascimento, E. R., Cozzuol, M. A., Sant'Anna Filho, M. J. (2010a). O primeiro registro de um proboscídeo não gonfoterídeo na América do Sul, um exemplo da “diversidade escondida” no passado da Amazônia. *VII Simpósio Brasileiro de Paleontologia de Vertebrados*, 97. Rio de Janeiro: SBP.
- Nascimento, E. R., Porto, A. S., Holanda, E. C., Gois, F., Cozzuol, M. A. (2003). A fauna local de mamíferos pleistocênicos das localidades de Araras/Periquitos e Taquara, Rondônia. *XVIII Congresso Brasileiro de Paleontologia*, 206-207. Brasília: SBG.
- Nascimento, E. R., Ribeiro, A. M., Ferigolo, J. (2010b). Considerações sobre *Eremotherium laurillardi* e *Trigodonops lopesi*, Formação Rio Madeira, estado de Rondônia, Brasil. *VII Simpósio Brasileiro de Paleontologia de Vertebrados*, 98. Rio de Janeiro: SBP.
- Nascimento, E. R., Ribeiro, A. M., Ferigolo, J., Cozzuol, M. A. (2005). Sobre os Proboscidea (Mammalia) do Pleistoceno do estado de Rondônia da Amazônia Sul-Occidental, Brasil. *II Congresso Latino-Americano de Paleontologia de Vertebrados*, 187-188. Rio de Janeiro.
- Pardo, A. P. (1996). Fosiles y fosilizacion: procesos y resultados de la larga historia subterranea. *Boletim SEA-PaleoEntomologia*, 16, 31-42.
- Paula Couto, C. (1979). *Tratado de Paleomastozoologia*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências.
- Pfretzschner, H. U. (2000). Microcracks and fossilization of Haversian bone. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 216(3), 413-432.
- Pfretzschner, H. U. (2004). Fossilization of Haversian bone in aquatic environments. *Comptes Rendus Palevol*, 3, 605-616.
- Pfretzschner, H. U., Tütken, T. (2011). Rolling bones - Taphonomy of Jurassic dinosaur bones inferred from diagenetic microcracks and mineral infillings. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 310, 117-123.
- Porto, A. S., Gois, F., Holanda, E. C., Nascimento, E. R., Cozzuol, M. A. (2004a). Ocorrência de *Xenarthra*, Cingulata e Pilosa do Estado de Rondônia como indicadores de paleoambientes. *XXV Congresso Brasileiro de Zoologia*, 269-270. Brasília: SBP.
- Porto, A. S., Gois, F., Nascimento, E. R., Holanda, E. C., Cozzuol, M. A. (2004b). *Xenarthra Pilosa (Edentata) do Quaternário do estado de Rondônia*. *XX Jornadas Argentinas de Paleontologia de Vertebrados*. La Plata.

- Quadros, M. L. E. S., Rizzotto, G. J., Oliveira, J. G. F., Castro, M. R. C. (2006). Depósitos fluviais da Formação Rio Madeira, Pleistoceno Superior da Bacia do Abunã, Rondônia. *IX Simpósio de Geologia da Amazônia*. Belém: SBG.
- Ray, S., Mukherjee, D., Bandyopadhyay, S. (2009). Growth patterns of fossil vertebrates as deduced from bone microstructure: case studies from India. *Journal of Bioscience*, 34(5), 661-672.
- Reumer, J. W. F. (2007). Habitat fragmentation and the extinction of mammoths (*Mammuthus primigenius*, Proboscidea, Mammalia): arguments for a causal relationship. *Courier Forschungs-Institut Senckenberg*, 259, 279-286.
- Ribeiro, R. C. (2010). *Aspectos tafonômicos dos fósseis da megafauna do Quaternário Tardio da Lagoa do Rumo, Baixa Grande, Bahia*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Rizzotto, G. J., Cruz, N. M., Oliveira, J. G., Quadros, M. L. E. S., Castro, J. M. (2006). Paleoambiente e o registro fossilífero pleistocênico dos sedimentos da Formação Rio Madeira. *IX Simpósio de Geologia da Amazônia*. Belém: SBG.
- Rogoz, A., Sawlowicz, Z., Wojtal, P. (2012). Diagenetic history of woolly mammoth (*Mammuthus primigenius*) skeletal remains from the archaeological Site Cracow Spadzista Street (b), Southern Poland. *Palaios*, 27(8), 541-549.
- Roth, S. (1898). *Grupo Ungulata. Órden Toxodontia*. Tomo VIII. Catálogo del Museo de La Plata. La Plata: Museo de La Plata.
- Santos, M. F. C. F., Bergqvist, L. P., Lima-Filho, F. P., Pereira, M. M. V. (2002). Feições tafonômicas observadas em fósseis pleistocênicos do Rio Grande do Norte. *Revista de Geologia*, 15, 31-41.
- Santos, T. T., Bissaro-Júnior, M. C., Kipnis, R. (2011). Caracterização tafonômica dos conjuntos fósseis de megafauna pleistocênica das localidades Araras/Periguitos. Prainha e Taquara, Formação Rio Madeira (Pleistoceno Tardio, Brasil). In: I. S. Carvalho, N. K. Srivastava, O. Strohschoen (Eds.), *Paleontologia: Cenários de Vida* (v. 3, 433-444). Rio de Janeiro: Interciência.
- Schweitzer, M. H. (2011). Soft tissue preservation in terrestrial Mesozoic vertebrates. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39, 187-216.
- Sifeddine, A., Fröhlich, F., Fournier, M., Martin, L., Servant, M., Soubiès, F., Turcq, B., Suguio, K., Volkmer-Ribeiro, C. (1994). La sedimentation lacustre indicateur de changements des paleoenvironnements au cours des 30,000 (Carajas, Amazonie, Bresil). *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris*, 318(2), 1645-1652.
- Souza, B. D., Di Domenico, C. M. H. F. (2012). Impregnação a vácuo de rochas friáveis, porosas e fraturadas para confecção de lâminas delgadas. *XLVI Congresso Brasileiro de Geologia*. Santos: SBG.
- Tomassini, R. L., Miño-Boilini, A. R., Zurita, A. E., Montalvo, C. I., Cesaretti, N. (2015). Modificaciones fosildiagenéticas en *Toxodon platensis* Owen, 1837 (Notoungulata, Toxodontidae) del Pleistoceno Tardío de la provincia de Corrientes, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(2), 283-292.
- Van der Hammen, T., Absy, M. L. (1994). Amazonia during the last glacial. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 109, 247-261.